

船舶避碰综合决策系统

A Synthetic Decision System for Ship Collision Avoidance

邱志雄

Qiu Zhixiong

兰培真

Lan Peizhen

(集美航海学院)

提 要

本文研究了船舶的避碰行为以及多船多衡准的避碰决策的思维过程,应用海上交通工程理论和模糊集理论,建立了多物标多衡准的船舶避碰综合决策模型。模型的应用结果表明,该模型可综合有关信息,模拟驾驶员的决策思维,连续、迅速、准确、可靠地提出最佳的避碰方案。避碰综合决策系统的应用将极大地提高船舶航行的安全,进而实现船舶驾驶的自动化。

关键词: 船舶避碰;船舶操纵;碰撞危险度;综合决策。

Abstract

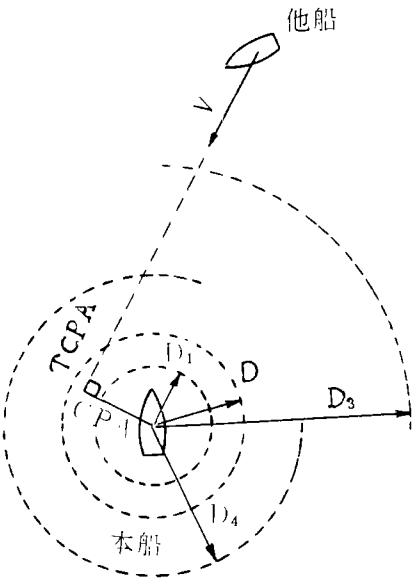
In this paper, collision avoidant actions and the consideration in making avoidant decision with multilateral criteria in case there are many ships are studied and synthetic decision model for collision avoidance is established. Application of this model shows that it can synthesize various information, simulate the considerations of the navigators when they are making decision and continuously make the most accurate and reliable collision avoiding plan. Therefore, this decision system will surely improve navigation safety and play its rule in navigation automatization.

一个决策过程,直观地说就是决策者寻找最佳方案的过程。ARPA 系统能对进入所置定的安全界限内的物标发出碰撞危险警报,并可通过人工试操船预报操船后的势态,供驾驶员选择避碰的方案。但是,在多船会遇局势以及多船报警的情况下,面对众多的 CPA 和 TCPA,各船对本船构成的碰撞危险性程度如何?哪艘船的碰撞危险性最大?另外,若进行了多种避碰方案的试操船后,何种方案最佳?这些就使广大的船舶驾驶员一筹莫展,往往由于对

试操船的方案人工进行判断选择而耽误了时间,以致丧失了安全避让的时机;或者由于多物标多衡准的避碰决策失误而造成避让措施不当。这是目前船舶交通安全战略研究中重要的课题之一,也是实现船舶避碰、驾驶自动化的关键。实际上,他船的动态是不确定的,作为碰撞危险性衡准的 CPA 和 TCPA 也是不确定的^[1],同时,CPA 和 TCPA 所描述的碰撞危险的界限同样也是不确定的,具有一定的模糊性。本文应用海上交通工程理论和模糊集理论,分析了在多船会遇中,船舶的避碰行为和衡量碰撞危险性程度的准则(CPA、TCPA)的模糊性,以及船舶行为的不确定性。根据避碰规则和海员的通常做法,首先建立了碰撞危险度的评价模型,其次建立了多物标多衡准的避碰综合决策模型,最后通过实例应用,检验该综合决策系统。

1 碰撞危险的识别与判定

1.1 定义:
会遇安全距离(SDA):在避让时,保证两船安全驶过的最小距离。
会遇最近距离(CPA):会遇时,两船间的最近距离。
到达会遇最近点的时间(TCPA):会遇时,两船到达最近点的时间。
船舶领域(Domain)^[2]:指每艘船舶周围的有效区域。该船驾驶员应将他船和其他物标保持在该区域之外,是船舶保持航行安全所需水域。实质上该领域是 SDA 在船舶 360°方位上的分布。



V_r ——相对速度
 D_1 ——DLA
 D_2 ——SDA
 D_3, D_4 ——Arena

图 1 船舶的 SDA,DLA,Arena,CPA 和 TCPA 示意图

动界(Arena)^[3]:船舶领域是驾驶员为了避免碰撞而希望保持的有效区域,但实际上驾驶员受到他船威胁的范围远大于船舶领域。为了让清他船,避免船舶领域被“侵犯”,驾驶员将需要提前采取适当的避碰行动。采取避碰行动时与他船的距离称动界。Davis 等人调查统

计结果表明,对不同舷角的来船,动界不一样^[4]。根据动界,如果让路船驶入直航船的动界而没采取避让行动,让路船被认为违背避碰规则,直航船应立即采取必要的行动以避免碰撞。

最晚避碰行动的两船间距(DLA):指当两船有碰撞危险时,本船采取舵让最晚点的两船间距。若小于该距离采取避碰行动,即使幸免碰撞也会形成紧迫局面^[6]。从安全考虑一般DLA 约为 12L(L—船长)^[6]。

每艘船舶的 SDA,Domain,Arena 和 DLA(如图 1 所示)是根据航区水域,能见度,通航密度,本船的操纵性能,风流浪的情况、航速、吃水和可用水深的关系,船吸的可能性,雷达等设备可能的误差以及避碰规则和海员的通常做法等因素而确定。

1.2 碰撞危险的识别

船舶航行中相遇,对碰撞危险的判定通常是根据 CPA 和 TCPA 是否小于置定的期望值,若小于期望值则认为有碰撞危险。分析人们的判断思维过程,实际上人们对客观存在的这种情形,即航行安全与碰撞危险的判定并没有明显的数量界限,是综合考虑了许多客观和主观因素,通过 CPA 和 TCPA 来分析、判断他船所构成的碰撞危险性。即从某一值域开始,随着它们的减小,人们感到船舶碰撞的危险性逐渐增大,当它们减小到即使采取避碰行动也不能保证两船安全驶过时,最终出现船舶碰撞。

把 CPA 和 TCPA 的变化域分别记为:U_c 和 U_t。在 U_c 和 U_t 上,对同一模糊概念“碰撞危险性”各自用一个模糊集来表示,记为: \tilde{A}_c, \tilde{A}_t ,经研究分析,本文建立了 \tilde{A}_c 和 \tilde{A}_t 的隶属函数:

$$\mu_{\tilde{A}_c}(CPA) = \begin{cases} 1 & CPA \leq d^1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{d_2 - d_1} \left(CPA - \frac{d_2 + d_1}{2}\right)\right) & d_1 < CPA \leq d_2 \\ 0 & d_2 < CPA \end{cases} \quad (1)$$

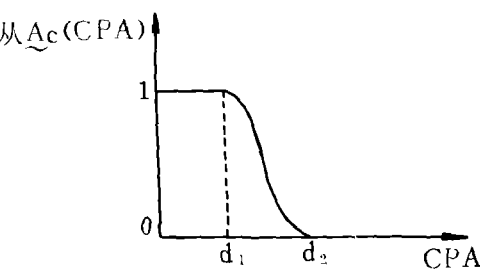


图 2 \tilde{A}_c 隶属函数

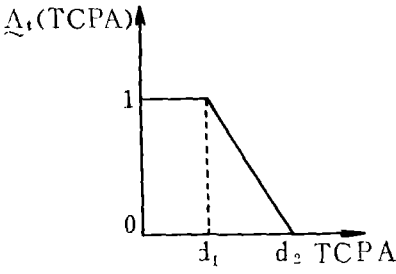


图 3 \tilde{A}_t 隶属函数

$$\mu_{\tilde{A}_t}(TCPA) = \begin{cases} 1 & TCPA \leq t_1 \\ \frac{t_2 - TCPA}{t_2 - t_1} & t_1 < TCPA \leq t_2 \\ 0 & t_2 < TCPA \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$t_1 = \begin{cases} \frac{\sqrt{DLA^2 - CPA^2}}{V_r} & CPA \leq DLA \\ \frac{DLA - CPA}{V_r} & CPA > DLA \end{cases} \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{Arena^2 - CPA^2}}{V_r} \quad (4)$$

$$d_1 = SDA$$

$$d_2 = k \cdot SDA, k > 0$$

k 是根据船舶状态的不稳定性(如航向等),两船行动可能的不协调以及雷达等设备可能的误差等因素来确定^[6],一般 $k=1.5 \sim 2$ 。

1.3 碰撞危险度

取论域 $U=U_c \times U_t$, 在论域 U 上“碰撞危险性”可表示为模糊集 $\tilde{A}^{(7)}$, 有

$$\tilde{A} = \tilde{A}_c \times \tilde{A}_t \quad (5)$$

亦即:

$$\mu_{\tilde{A}}(CPA, TCPA) = \mu_{\tilde{A}_c}(CPA) \oplus \mu_{\tilde{A}_t}(TCPA) \quad (6)$$

其中: $a \oplus b = \min(\frac{a+b}{2}, 1)$ 。

这里定义 \tilde{A} 的隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(CPA, TCPA)$ 为在该会遇局势下, 他船对本船构成的碰撞危险度。

2 避碰综合决策模型

设有 n 个物标, 其物标集为:

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$$

设对会遇局势有 m 种避碰方案, 对策集合为:

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$$

决策时考虑到 l 种衡量准则, 则准则集为:

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}$$

该会遇局势的碰撞危险测度:

$$\mu_{\tilde{A}}^* \triangleq \max_{1 \leq i \leq n} [\mu_{\tilde{A}}(CPA_i, TCPA_i)] \quad (7)$$

对于每一衡准 y_k , 有一对策矩阵:

$$R^{(k)} = (r_{ij}^{(k)}) \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, l. \quad (8)$$

其中, $r_{ij}^{(k)}$ 称采取对策 P_j 对付物标 g_i 在衡准 y_k 下存在的碰撞危险度, 即 $r_{ij}^{(k)} = \mu_{\tilde{A}}^*(CPA_{ij}, TCPA_{ij})$ 。 $r_{ij}^{(k)} = 1$ 意味着 P_j 在 y_k 的衡量下不能对付 g_i , 即会碰撞, 是不相容局势。 $r_{ij}^{(k)} = 0$ 意味着 P_j 在 y_k 的衡量下, 完全能对付 g_i , 即两船可安全驶过。其他为中间情况。

将各种衡准综合起来, 得到一个综合对策矩阵:

$$R^\Sigma = (r_{ij}^\Sigma) \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, m \end{matrix} \quad (9)$$

其中, $r_{ij}^z = f(r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}, \dots, r_{ij}^{(j)}) = r_{ij}^{(1)} \oplus r_{ij}^{(2)} \oplus \dots \oplus r_{ij}^{(j)}$ 。

由综合对策矩阵, 得到一个综合决策(避碰效果测度)矩阵:

$$R_j^z = (r_{ij}^z) \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (10)$$

其中: $r_{ij}^z = g(r_{ij}^z, r_{ij}^z, \dots, V r_{ij}^z) = r_{ij}^z V r_{ij}^z V \dots V r_{ij}^z$ 。

设 λ 为碰撞危险测度阈值, 对于对策 U_{j_0} , 若有 $j_0 \leq m$, 使

$$r_{ij_0}^z = \min_{1 \leq j \leq m} r_{ij}^z \leq \lambda, 0 \leq \lambda < 1 \quad (11)$$

则称方案 P_{j_0} 为会遇局势的最佳决策方案。

如果 $r_{ij_0}^z = \min_{1 \leq j \leq m} r_{ij}^z > \lambda$, 则需修改避碰方案, 重新计算直至(11)式满足。对于 λ 值的选择应充分地考虑主客观因素、因外界因素, 通常 λ 取 0.5。

采取 P_{j_0} 措施后, 船舶避碰效果评价:

$$R_{j_0}^z = (r_{ij_0}^z) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

其表明在新的相遇局势下, 各物标对本船所构成的碰撞危险度。

3 模型的应用

3.1 会遇局势

设本船航速(V_0)14kn, 航向(C_0)060°, 会遇局势物标的动态如表 1 所列。

表 1 物标运动状态

物标(G)	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6
航向(C_0)	125°	133°	036°	021°	029°	043°
速度(V)	16	10	8	15	14	14
距离(D)	3.75	3.25	5.0	3.25	3.0	3.5
舷角(Q)	335°	010°	035°	065°	121°	102°

单位: V ——kn; D ——n mile

根据各有关因素, 置定:

$DLA = 1n \text{ mile}$; $SDA = 1n \text{ mile}$; $k = 2$; $\lambda = 0.5$;

$$Arena = \begin{cases} 4.3n \text{ mile} & 0^\circ \leq Q \leq 90^\circ \text{〔5〕} \\ 2.6n \text{ mile} & 90^\circ < Q < 360^\circ \end{cases}$$

设准则集 $Y = \{CPA, TCPA\}$ 。

3.2 碰撞危险测度

3.2.1 A隶属函数

根据 3.1 计算得该会遇局势下的 CPA, TCPA 和 μ_A , 列表(表 2)如下:

表 2 物标的 CPA、TCPA 和 $\mu_{\sim A}$

物标	CPA (n mile)	TCPA (h)	$\mu_{\sim A}$ (CPA, TCPA)
g_1	1.188	0.22	0.458
g_2	1.732	0.184	0.084
g_3	0.947	0.66	0.5
g_4	1.677	0.286	0.245
g_5	1.339	0.359	0.371
g_6	0.031	0.846	0.621

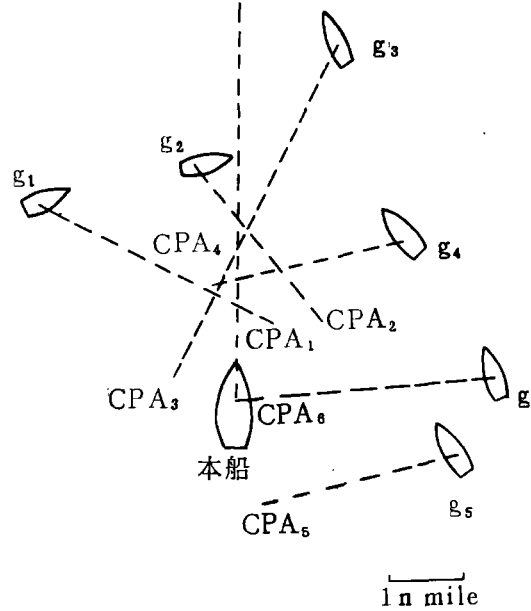


图 4 船舶会遇局势

3.2.2 碰撞危险测度

在该会遇局势(图 4)下,本船所面临的碰撞危险测度:

$$\mu_{\sim A}^* = 0.621$$

3.3 避碰方案综合决策

设拟考虑采取五种避碰措施(方案)即:

- P_1 ——向右转向 10° ;
- P_2 ——向右转向 20° ;
- P_3 ——向右转向 35° ;
- P_4 ——向右转向 20° , 减速 $V_0=5kn$;
- P_5 ——向左转向 20° 。

(注:实际避碰决策系统的设计,可建立避碰方案库。)

得对策矩阵:

$$R^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0.228 \\ 0.811 & 1 & 1 & 0 & 0.727 \\ 0 & 0 & 0.824 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.527 \\ 0 & 1 & 1 & 0.621 & 0.11 \\ 1 & 1 & 0.999 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.254 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.268 & 0.455 & 0.272 & 0.427 & 0.253 \\ 0 & 0.362 & 0.387 & 0.316 & 0 \\ 0.240 & 0.235 & 0.196 & 0.278 & 0 \end{pmatrix}$$

将准则综合起来,得到综合对策矩阵:

$$R^x = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0.114 \\ 0.406 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0.491 \\ 0 & 0 & 0.412 & 0 & 0 \\ 0.134 & 0.228 & 0.136 & 0.213 & 0.39 \\ 0 & 0.681 & 0.694 & 0.469 & 0.055 \\ 0.62 & 0.618 & 0.598 & 0.139 & 0.5 \end{bmatrix}$$

则方案综合决策矩阵为:

$$R_2^x = (0.62 \quad 0.681 \quad 0.694 \quad 0.469 \quad 0.5)$$

因为:

$$r_{24}^x = \min_{1 \leq j \leq 5} r_{2j}^x = 0.469 \leq 0.5$$

所以方案 P_4 为最佳的避碰方案。

在采取了 P_4 措施后的新相遇局势下,各物标的碰撞危险度评价:

$$R_4^x = (r_{4i}^x) = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.213 \quad 0.469 \quad 0.139)^T$$

船舶碰撞危险度及方案综合决策分析结果表明(见表 3),在所考虑的避碰方案中,采取保速向右转向的措施均未能减小碰撞的危险度,而只有采取右转向并减速(右转 20° , $V_0 = 5\text{kn}$),才能减小碰撞危险度。采用向左转 20° 的措施也能减小碰撞危险度,但减小程度比右转 20° 并减速的措施略小一些,这结论与实际情况完全一致。

表 3 会遇局势及避碰综合决策分析结果 单位:CPA—n mile
TCPA—h

物 标	避 碰 方 案 效 果	$V_0=14\text{kn}$ 右转 10°	$V_0=14\text{kn}$ 右转 20°	$V_0=14\text{kn}$ 右转 35°	$V_0=5\text{kn}$ 右转 20°	$V_0=14\text{kn}$ 左转 20°
g_1	CPA	0.958	0.757	0.585	3.04	1.683
	TCPA	0.26	0.316	0.463	0.169	0.165
	μ_{\sim}^A	0.5	0.5	0.5	0	0.114
g_2	CPA	1.286	0.842	0.009	2.998	1.35
	TCPA	0.23	0.278	0.374	0.156	0.168
	μ_{\sim}^A	0.406	0.5	0.5	0	0.491
g_3	CPA	2.213	2.42	1.276	4.994	2.071
	TCPA	0.52	0.44	0.402	0.042	0.752
	μ_{\sim}^A	0	0	0.412	0	0
g_4	CPA	2.242	2.045	2.323	3.166	1.483
	TCPA	0.195	0.177	0.13	0.056	0.591
	μ_{\sim}^A	0.134	0.228	0.136	0.213	0.39
g_5	CPA	1.099	0.853	0.469	1.422	1.785
	TCPA	0.285	0.239	0.194	0.229	0.9
	μ_{\sim}^A	0	0.681	0.694	0.469	0.055
g_6	CPA	0.275	0.578	1.023	3.153	0.817
	TCPA	0.534	0.388	0.273	0.145	4.643
	μ_{\sim}^A	0.62	0.618	0.598	0.139	0.5

物标 避碰方案 效果	$V_o=14\text{kn}$ 右转 10°	$V_o=14\text{kn}$ 右转 20°	$V_o=14\text{kn}$ 右转 35°	$V_o=5\text{kn}$ 右转 20°	$V_o=14\text{kn}$ 左转 20°
效果测度	0.62	0.681	0.694	0.469	0.5

3.4 避碰综合决策系统框图

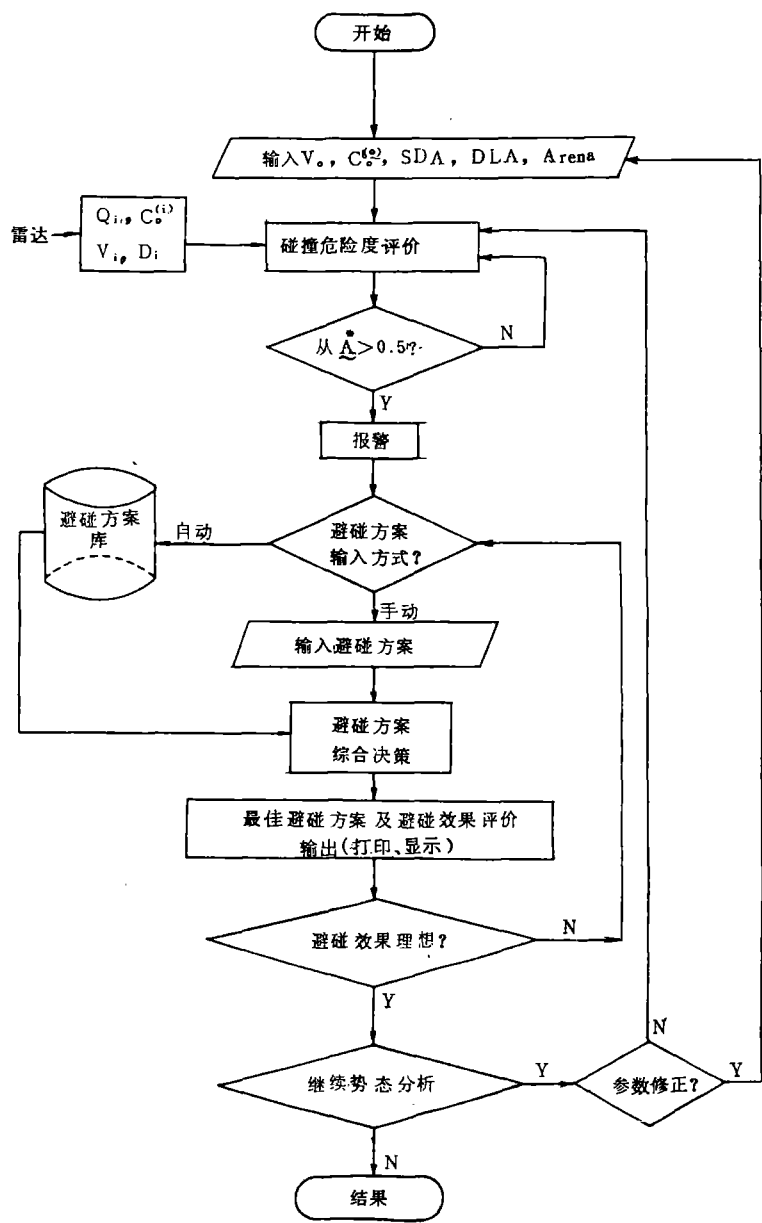


图 5 决策系统框图

4 结束语

避碰综合决策系统的应用结果表明,本文所建立的船舶避碰综合决策模型,通过船舶避碰行为的研究,以碰撞危险度、避碰效果测度作为尺度,在其基础上所进行的避碰综合决策,可充分地体现驾驶员(决策者)的主观愿望,模拟驾驶员的决策经验,综合有关信息并及时、准确地综合、处理,具有平行思考的模糊化思维。该决策系统具有决策分析迅速连续、准确、可靠的特点,将极大地提高船舶航行的安全性,在雷达、电子海图和 GPS 等系统的支持下,可实现船舶驾驶自动化。

参考文献

- [1]藤井弥平等. 海上交通工学. 日本:海文堂,1981
- [2]藤井弥平. 序说海上交通工学. 日本:海文堂,1971
- [3]吴兆麟. 海上交通工程概述. 大连海运学院,1986
- [4]Curtis R. G 等, Validation of Radar Simulator Results. The Journal of Navigation, 1981, 34
- [5]王逢辰等. 船艺(下册). 人民交通出版社,1980
- [6]今津,小山. 避航開始時機の決定について. 日本航海学会论文集,1984,70
- [7]汪培庄. 模糊集合论及其应用. 上海科技出版社,1983
- [8]今津. 衝突危険の評価について. 日本:航海,1984,80
- [9]邓聚龙. 灰色预测与决策. 华中工学院出版社,1986
- [10]Colley 等. On marine traffic flow and collision avoidance computer simulation. The Journal of Navigation, 1984, 37
- [11]M. J. Dove 等. An automatic collision avoidance and guidance system for marine vehicles in confined waters. The Journal of Navigation, 1985, 39